



А. А. Карпузов
главный менеджер Депар-
тамента геологоразведки
ОАО «ГМК «Норильский никель»
karpuzovaa@normik.ru



В. В. Терновой
главный специалист Депар-
тамента проектных работ
ООО «Институт Гипроникель»

Прогнозно-поисковое моделирование при изучении геологических объектов и оценки перспектив освоения рудных месторождений

Рассмотрены основные этапы моделирования геолого-металлогенических объектов на примерах Юрчикского расслоенного интрузива, Центральная Камчатка, и сульфидного никелевого месторождения в Австралии.

The review considers initial modeling phases of geological eg. Yurchik differentiated intrusion in Central part of Kamchatka peninsula and metallogenic eg. nickel sulfide deposit in Western Australia targets.

Ключевые слова: прогноз, объект, каркасная и блочная модели, никелевое оруденение, оценка, месторождение, руда, коматииты.

Keywords: forecast, target, wireframe, blockmodel, nickel mineralization, assessment, deposit, ore, komatiites.

На фоне существующих экономических реалий, истощенности ресурса легкооткрываемых месторождений и общего снижения ассигнований на геологоразведочные работы (ГРР) особенно остро стоят вопросы моделирования крупнообъемных рудных месторождений традиционных и особенно нетрадиционных типов как возможных объектов добычи металлов на среднесрочную перспективу. Реализация этой задачи на современном уровне требует привлечения и анализа обширного объема графической и табличной информации в комплексе с элементами баз знаний о поисковых признаках, закономерностях распространения геологических и рудных объектов, металлогенических (рудообразующих) систем. Моделирование геологических объектов (магматических массивов, вулканических аппаратов), геологический аудит месторождений, программы развития горнорудных районов (геолого-экономических кластеров) и месторождений, прогноз и оценка объектов недропользования – вот далеко не полный перечень направлений, в которых трудно рассчитывать на положительный результат без использования качественных и количественных моделей. Тем более что использование методов геостатистики и информационных технологий при выполнении данных работ – обязательное требование международных стандартов оценки запасов месторождений.

Схематически направленность процесса моделирования можно представить в виде следующей схемы (от общего к частному) (*рис. 1*):

Под типовой моделью понимается некая группа геологических (магматический массив, вулканическая структура и др.) или металлогенических объектов (рудных узлов, месторождений и т.д.), обладающих одинаковыми свойствами (признаками). Комплексная геолого-прогнозная (для геологических объектов), прогнозно-поисковая (для разноранговых

Особенно остро стоят вопросы моделирования крупнообъемных рудных месторождений традиционных и нетрадиционных типов как возможных объектов добычи металлов на среднесрочную перспективу.

металлогенических объектов) или прогнозно-эксплуатационная (для месторождения) модели – это симбиоз частных качественных и количественных моделей: геологической, структурно-тектонической, геофизической, магматической, метасоматической, геохимической, геолого-экономической [1].

Геологическая модель отражает особенности геологического строения объекта, его связи с вещественными комплексами (геологическими формациями), их эволюцию в пространстве и во времени.



Структурно-тектоническая модель показывает позицию объекта и его связи с поверхностными и глубинными структурами, роль тектоники в процессе рудогенеза.

Геофизические модели отражают позицию объектов в геофизических полях, подчеркивают их связи с энергетическими очагами и вещественными комплексами.

Магматические модели характеризуют масштабность магматических процессов, их латеральную и вертикальную зональность, пространственные соотношения и генетические связи продуктов магматизма с оруденением. Известные рудно-магматогенные системы (порфировая, кимберлит-карбонатитовая, рудоносных гранитоидов, расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузий и др.) вмещают наиболее крупные рудные объекты и обладают высокоупорядоченной магматической зональностью и колоссальными объемами продуктов метасоматоза, которые, с учетом новых технологических возможностей извлечения полезных компонентов, сами могут выступать в качестве крупнообъемных металлогенических объектов на широкий круг металлов. Новые методы исследований продуктов магматизма значительно повысили уровень достоверности данной модели, перевели ее из разряда качественной в количественную на основе применения многочисленных коэффициентов пересчета, корреляции, которые позволяют уже на поисковых этапах оценивать уровень их рудоносности.

Минералогические и геохимические модели имеют количественный характер и особенно эффективны для оценки масштаба, эродированности и качества руд, прогноза слепых тел и рудных столбов. Это обусловлено прежде всего тем, что все крупные объекты (магматические массивы, вулканические аппараты, крупные рудные месторождения) отличаются длительной эволюцией процессов их формирования и выдержанным вектором геохимической зональности, количественные характеристики которой позволяют достаточно уверенно определять надрудные, рудные и подрудные зоны рудной (или вулкано-магматической) колонн.

Рудногеологическая модель отражает состав, характеристику, форму локализации и характер зональности рудных тел и применима только к металлогеническим объектам.

Геолого-экономическая модель наиболее применима к металлогеническим объектам и характеризует степень их изученности, ресурсную базу в системе ресурсы-запасы, основные параметры освоения (содержание

полезных компонентов, блокировка запасов, объемы рудной массы и т.д.).

Информационное наполнение процесса моделирования проиллюстрируем на примерах построения прогнозно-геологической модели Юрчикского потенциально никеленосного расслоенного мафит-ультрамафитового массива (Центральная Камчатка) и прогнозно-эксплуатационной 3D-модели для одного из сульфидных никелевых месторождений в ультрамафитах (Западная Австралия).

Юрчикский массив расположен на юго-западном фланге Ганальского кристаллического выступа Центральной Камчатки, сложенного

Проведенный анализ всей совокупности геологических, геофизических, геохимических материалов, многочисленных производных характеристик, позволил построить прогнозно-геологическую модель.

метаморфическими образованиями раннего-среднего палеозоя и образован двумя фазами: первой – габбро-норитовой и второй – пироксенит-кортландитовой. Оценки возраста в диапазоне от 42 до 21 млн лет, что соответствует эоцену. Его площадь около 65 км²; он приурочен к ядру купольной структуры; имеет овальную форму и вытянут в северо-западном направлении; контакты, как правило, резкие, крутые (до 70-80°), падение – центроклинальное. В магнитном поле массиву отвечает интенсивная положительная аномалия с контурами, соответствующими границам массива. В гравитационном поле интрузив выражается обширным локальным максимумом.

Проведенный анализ всей совокупности геологических, геофизических, геохимических материалов, а также многочисленных производных характеристик, полученных в результате детального изучения вещественных комплексов, позволил построить прогнозно-геологическую модель (ПГМ) массива (*табл. 1*). ПГМ состоит из нескольких частных моделей. Согласно геологической модели, Юрчикский массив относится к крупным (п x 10 кв.км) геологическим объектам с установленной глубиной 3-3,5 км и сложен породами кортландит-габбро-норитовой формации. Структурно-тектонически интрузив приурочен к выступу метаморфического фундамента среднего палеозоя наиболее приподнятого блока Корякско-Камчатской

Прогнозно-геологическая модель интрузивного массива и прогнозно-эксплуатационная модель сульфидного никелевого месторождения

Таблица 1

Частные модели и их компоненты	Модель массива Юрчикский интрузив, Центральная Камчатка	Модель месторождения в ультрамфитах, Западная Австралия
Геологическая модель:		
параметры объекта	п x 10 кв.км x 3,5 км	около 1 кв.км x 1,5 км
типовая формация	кортландит- габбро- норитовая	коматитовая
возраст интрузива	эоценовый 21-42 млн лет	протерозой 1900 млн. лет
Структурно-тектоническая модель:		
региональная	кристаллический выступ фундамента Коряско-Камчатской покровно - складчатой зоны	не выражена
локальная	Ганальский горст	не установлена
Геофизическая модель:		
магнитное поле	контрастная магнитная аномалия	
гравитационное поле	локальный максимум	
Магматическая модель:		
фазы формирования	2-фазный массив	1-фазный массив
количество наблюдаемых магматических ритмов	1	н/н
расслоенность магматических ритмов (снизу вверх)	от ультрамфитов (дуниты-кортландиты) до мафитов (габбро)	н/н
степень метасоматических изменений	высокая: амфиболитизация, серпентинизация	высокая: серпентинизация, оталькование, карбонатизация
Минералогическая модель:		
главные петрогенные минералы	оливин, клинопироксен, ортопироксен, амфиболы; оливин и амфиболы высокомагнезиальные, железистые	
главные рудные минералы	пирротин, пентландит, магнетит	пирит, миллерит, герсдорфит и магнетит
минералогическая зональность	Ol → Ol + Орх ± Срх ± Амф → Орх + Срх + Амф + Pl → Срх + Амф + Pl	Ol → Ol + Орх ± Срх ± Амф → Орх + Срх + Амф + Тl → Амф + Тl + Кар.
типоморфные элементы	железо, медь	железо, мышьяк, кобальт, хром, титан, ванадий
элементы - примеси		мышьяк – 10-70 г/т
распределение никеля в минералах и рудах		в миллерите - около 60%; несulfидный: 3-15% в серпентинитах, более 40% в тальк-карбонатных выветрелых породах
типы руд		вкрапленные тонкозернистые; вкрапленные крупнозернистые до псевдомассивных
Геохимическая модель:		
петрогеохимическая специализация	нормальный ряд известково-щелочной серии натриевого типа	
петрогеохимическая характеристика	близок к составу N-MORB; обогащен легкими РЗЭ (Rb,Sr), Ni, Cr, Cu; обеднены Co, Ti, Nb,Ta.	близок к составу N-MORB, обогащен легкими РЗЭ (Rb,Sr), Ni, Cr, As,Co, Ti, Nb,Ta.
геохимическая специализация	Fe, Cu	As, Cr, V, Ni, Co, Pb, Fe
петрогеохимические показатели	Ni/Cu =2- 3, Ni/Co= 9,5, Ni/ Fe менее 1.	Ni/Cu=65, Ni/ Co= 30, Ni/Fe= 1
Рудногеологическая модель:		
параметры и форма локализации рудных тел		серия крутопадающих линзовидных тел (более 15), разведаны на глубину более 1500 м; в пределах коматитового комплекса выявлены две залежи вкрапленных руд внутри 800-метровой зоны вкрапленной минерализации конической формы: 1 - протяженностью 350 м при ширине 30-150 м, 2 - протяженностью 150 м при ширине 50 м
содержание сульфидов в рудах		среднее содержание 2-3% (до 10%) при бортовом содержании никеля 0,4%
Геолого-экономическая модель		
плотность разведочной сети (разведанность р.т)/ категория запасов)		10-25 x10-25м /B 25-50 x 25-50 /C 100-200 x 100-200м /C ₂
бортное содержание никеля, %		0,2; 0,3; 0,4
минимальная мощность рудных тел (м)		5
максимальная мощность пустых прослоев (м)		5
размер стандартного блока в модели		12,5 x 6,25 x 5
минимальный размер расчетных блоков (м)		6,25 x 1,6 x 2,5
количество блоков		более 1 млн
количество расчетных скважин (шт)		900
коэффициент извлечения никеля		67 %

покровно-складчатой зоны и расположен в пределах Ганальского горста. Магмо-метасоматическая модель отражает характер расслоенности массива в составе магматической колонны, его эволюцию и степень метасоматических изменений. Нижняя ультрамафитовая зона массива представлена кортландитами, дунитами и перидотитами (с содержанием оливина до 95 об.%); выше них развита норитовая зона; средняя габбро-норитовая зона представляют собой практически недифференцированную монотонную толщу. Верхняя, габбровая зона массива сложена крупнозернистыми роговообманковыми габбро; минерал-индикатор расслоенности – оливин; повсеместно проявлена амфиболитизация.

Минералогическая-геохимическая модель массива выражается последовательной сменой (снизу вверх) минеральных ассоциаций, подчеркивающих расслоенность: $Ol - Ol + Orx \pm Crx \pm Amph - Orx + Crx + Amph + Pl - Crx + Amph + Pl$. Оливин относится к высокомагнезиальным, железистым разновидностям, роговая обманка – к умеренно глиноземистым и высокомагнезиальным. Главные рудные минералы – пирротин, пентландит и магнетит при следующих геохимических показателях $Ni/Cu=2-3$; $Ni/Co=9,5$; Ni/Fe – менее 1.

По петрогеохимической специализации породы интрузии относятся к нормальному ряду известково-щелочной серии натриевого типа. По геохимической характеристике они близки к составу N-MORB, обогащены легкими РЗЭ (Rb, Sr), Ni и Ст, и обеднены Co, Ti, Nb, Ta. Геохимическая характеристика Юрчикского интрузива выражается в обогащении пород и минералов железом и медью.

Формирование прогнозно-эксплуатационных моделей (ПЭМ) металлогенических объектов требует привлечения значительно большего фактического материала, а сами модели отличаются большей детальностью и сложностью. В геологических службах Австралии, США, Канады отправным моментом при выполнении моделирования является создание «образа» (модели) металлогенического таксона (рудного района, месторождения и т.д.), сформулированного на основе картографических и табличных данных, учитывающих особенности геологического строения территории, химического и минерального состава рудных тел и вмещающих толщ, место процессов рудообразования в геологическом развитии района. Только такой подход обеспечивает эффективную связь фактического материала с теоретическими

представлениями об особенностях рудообразования в различных геодинамических условиях. На современном этапе весь геологический мир уже перешел от статичных плоскостных моделей к динамичным 3D-моделям. Для того чтобы эти модели имели высокую степень достоверности, их построение необходимо вести с использованием данных бурения, глубинной геофизики и подземных горных выработок в достаточных объемах, что иллюстрируется примером по одному из австралийских сульфидных никелевых месторождений (рис. 2).

На современном этапе изучения новых высоко-ресурсных геолого-металлогенических объектов моделирование выступает обязательным инструментом, обеспечивающим достоверность и надежность получаемых результатов.

Месторождение расположено в 600 км к востоку от г. Перт (Западная Австралия). Никелевая минерализация развита в пределах (Hicks & Balfe, 1998) коматиитового комплекса и приурочена к дугообразным линзам длиной до 3,5 и шириной до 0,6 км, представленным оливиновыми кумулатами и потоками коматиитовых пород. Отмечается наличие графитовых черных сланцев, располагающихся в 700 м над кровлей и под подошвой коматиитового комплекса (Hicks & Gamble, 2001).

Никеленосные породы коматиитового комплекса интенсивно карбонатизированы с образованием тальк-карбонатных \pm кварц-серицитовых ассоциаций по серпентинитам.

Комплекс подстилается мощной толщей андезитовых лав; внутри него установлены три фельзитовых массива; все породы контактируют с коматиитами и залегают согласно с ними.

Крупных разрывных структур внутри комплекса не выявлено.

Оруденение представлено массивными и вкрапленными никелевыми сульфидными рудами, локализованными у нижнего контакта коматиитов. Построенная по комплексу геологоразведочных материалов прогнозно-эксплуатационная модель (ПЭМ) месторождения представлена в **табл. 1**. Согласно ПЭМ, каждая из частных моделей характеризует положение месторождения в системе вмещающие породы-структура-магматизм-метасоматоз-рудогенез

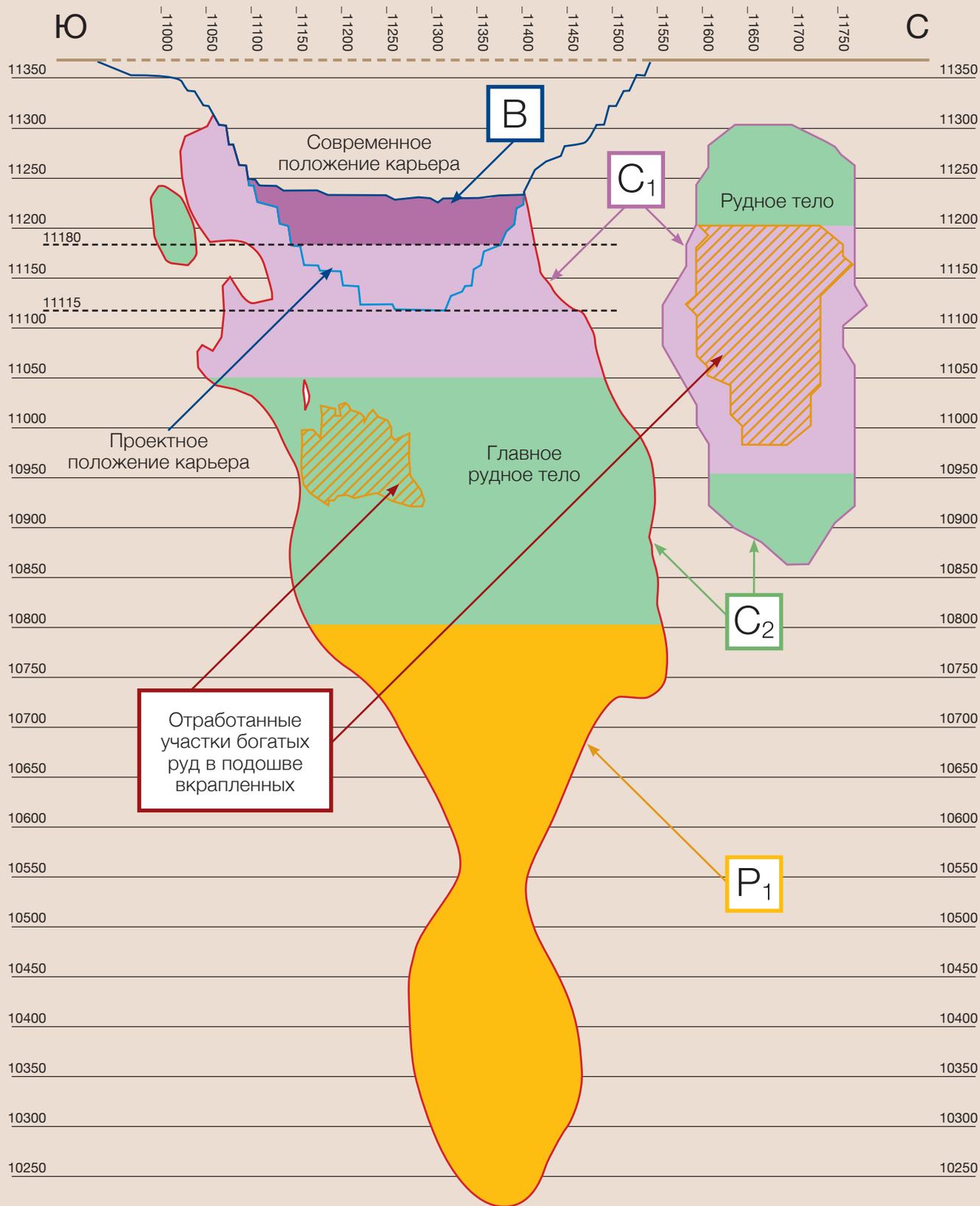
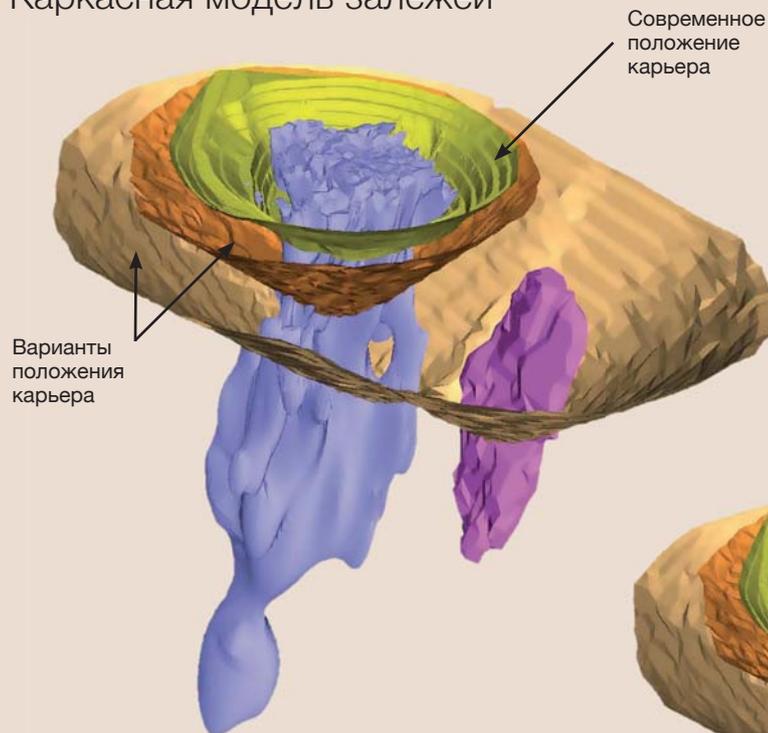


Рис. 2.
 Графическая модель классификации
 запасов-ресурсов вкрапленных нике-
 левых руд месторождения

Каркасная модель залежей



Блочная модель залежей

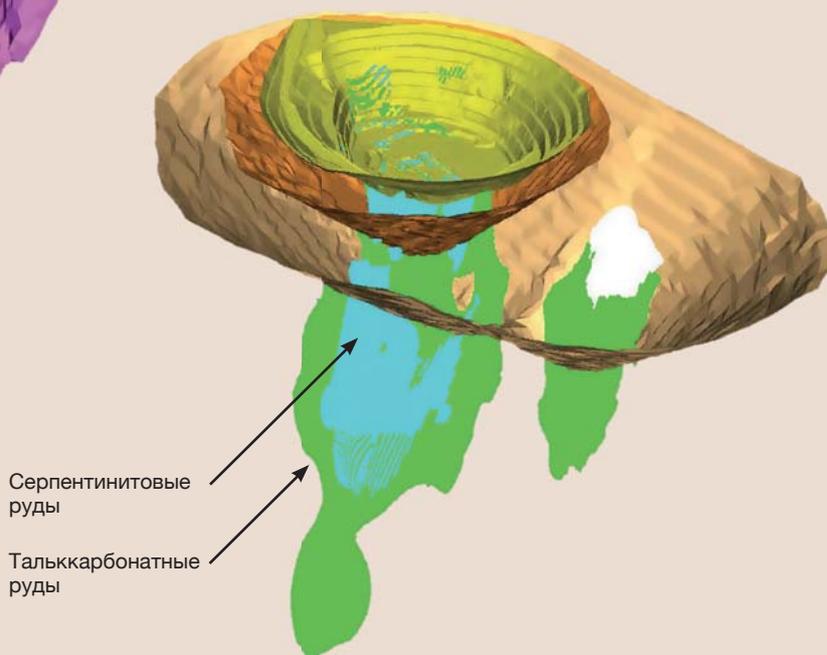


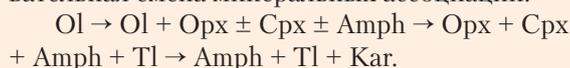
Рис. 3.
Каркасная и блочная модели месторождения никелевых руд (бортное содержание никеля 0,3%)

или в геофизических и геохимических полях. Геологическая модель характеризует параметры, вещественный состав, возраст формирования рудовмещающих коматиитов.

Метасоматическая модель отражает характер зональности, эволюцию и степень изменения пород. Вертикальная зональность выражается в смене (сверху вниз) серпентинитов минерализованными серпентинитами, далее – оталькованными, тальк-карбонатными породами и рудным телом.

Минералого-геохимическая модель месторождения включает данные о минералогическом составе, петрохимических, геохимических характеристиках главных рудных минералов и геохимической зональности. По вертикали

(от подошвы к кровле) наблюдается последовательная смена минеральных ассоциаций:



Оливин и амфиболы относятся к высокомагнезиальным, железистым разностям. Главные рудные минералы – пирит, миллерит, герсдорфит и магнетит характеризуются следующими геохимическими показателями: Ni/Cu=65, Ni/Co=30, Ni/Fe=1. Присутствие магнетита – обычное явление.

Из общего объема никеля в миллерите около 60%, в том числе в линеите и виоларите – 25-30%; несulfидного никеля – 3-15% в серпентинитах и более 40% в тальк-карбонатных породах. Содержание мышьяка

в рудах – 10-70 г/т (80-90% в герсдорфите), концентрация уменьшается с глубиной.

Выделяется два типа вкрапленных сульфидных никелевых руд:

- вкрапленные тонкозернистые (рудные зерна размером 2-3 мм заполняют интерстиции между зернами псевдоморфоз по оливину);
- вкрапленные крупнозернистые, псевдомасивные (с зернами до 10 мм).

Руды первого типа слагает большую часть рудных тел, второго формируют малые обособленные богатые горизонты в пределах минерализованного контура.

Рудногеологическая модель отражает состав, характеристику, форму локализации и характер зональности рудных тел. Массивные никелевые руды месторождения образуют серию крутопадающих линзовидных тел (более 15), приуроченных к базальному контакту коматиитового комплекса. Первичная минерализация – пирит-миллерит-магнетитовая – с небольшим количеством пентландита, виоларита, халькопирита и герсдорфита. Рудные тела круто падают на север и разведаны на глубину более 1500 м.

В пределах коматиитового комплекса выявлены две залежи вкрапленных руд. Обе они находятся внутри 800-метровой зоны вкрапленной минерализации.

Среднее содержание сульфидов в рудах 2-3% (до 10%). Основная рудная залежь, оконеченная по бортовому содержанию никеля 0,4%, – тело конической формы длиной 350 м при ширине 30-150 м залегает в 30-80 м выше базального контакта с коматиитовым комплексом. В кровле и подошве выделяются менее мощные линзовидные тела вкрапленных руд.

Геолого-экономическая модель отражает соотношение системы запасы-ресурсы главных рудных элементов, их категоричность, содержания никеля и степень разведанности рудных тел. Австралийской геологической службой принята классификация ресурсов по Кодексу JORC [3]. Согласно Кодексу, выделение категорий осуществляется по следующим признакам: измеренные (measured) – разведанные по сети 10x10м, исчисленные

(выявленные – indicated) – по сети 25x25 м, предполагаемые (inferred) отражают низкую плотность данных.

По российской классификации [2] для месторождений данной (второй) группы сложности запасы/ресурсы могут быть отнесены соответственно к категориям В, С1, С2 и Р1. Упрощенная графическая модель распределения запасов по категориям корреспондируется с классификацией Кодекса JORC (**рис. 2**). В создании модели месторождения вкрапленных сульфидных никелевых руд (Западная Австралия) при помощи программ Datamine и Surgras использованы 153 скважины. На **рис. 3** представлены каркасный и блочный варианты модели.

Выводы, вытекающие из приведенных данных, заключаются в следующем:

1. На современном этапе изучения, прогнозирования и оценки перспектив новых разноразнообразных, высокоресурсных геолого-металлогенетических объектов моделирование, в первую очередь объемное, выступает обязательным инструментом, обеспечивающим достоверность и надежность получаемых результатов.
2. Прогнозно-геологическая модель Юрчикского расслоенного мафит-ультрамафитового массива (Центральная Камчатка) может быть использована как пример изучения и оценки никеленосных мафит-ультрамафитовых расслоенных интрузий.
3. Прогнозно-эксплуатационная 3D-модель месторождения вкрапленных сульфидных никелевых руд Западной Австралии представляет собой графическую геолого-экономическую основу проектирования его системы разработки, а полученные при этом количественные оценки ресурсов/запасов никелевых руд с использованием австралийских норм и правил отчетности (Кодекс JORC) могут быть гармонизированы с российскими требованиями.
4. Успешное сближение российских и международных стандартов оценки минерально-сырьевых ресурсов обеспечивается применением методов геостатистики и использованием горно-геологических информационных технологий. 

Использованная литература

1. Карпузов А.А., Карпузов А.Ф. Прогнозно-поисковые модели рудных месторождений как основа прогнозирования и оценки перспектив новых высокоресурсных металлогенетических объектов. Тезисы доклада на 5-й Международной конференции «Молодые – наукам о Земле», М., 23-25 марта 2010 г., РГГРУ.
2. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Никелевые и кобальтовые руды. М., 2007.
3. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code), 2004 Edition. Prepared by: The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC).